

УДК 539.104, 537.311.33, 621.315.5

Петро Трохимчук

*Східноєвропейський національний університет імені Лесі Українки,
м. Луцьк, Україна*

РЕЛАКСАЦІЙНА ОПТИКА ТА СИНЕРГЕТИКА

Релаксаційна оптика (РО) вивчає процеси незворотної взаємодії оптичного випромінювання з твердими тілами [1]. Цей розділ фізики є синтезом квантової електроніки, радіаційної фізики твердого тіла, фізичної хімії, фізики плазми та нерівноважної термодинаміки [1 – 3].

Необхідність виникнення такого розділу фізики обумовлена в першу чергу пошуком нових ефективних технологічних методів мінітюаризації та підвищення надійності елементів оптоелектронних систем (включаючи наноструктури), а також розширенням застосування лазерного випромінювання для інших технологій [1, 2].

В основу релаксаційної оптики покладена кінетична класифікація явищ взаємодії оптичного випромінювання з твердими тілами (Таблиця 1) [1, 2].

Таблиця 1 - Основні ефекти релаксаційної оптики

Кінетичні ефекти	Динамічні ефекти	Змішані ефекти
1. $\tau_0 > \tau_h$; $\tau, \tau' \gg \tau_h, \tau_r$ для будь-яких N_f та N_s маємо фотохімічні процеси (за винятком $N_f \geq N_s$) 2. $\tau_0 < \tau_h$; $\tau_h < \tau' < \tau_r$; $\tau < \tau_r$; $h\nu > E_g$ – фотостимульоване підпорогове дефектоутворення 3. $\tau > \tau_h, \tau_r$; $N_f \ll N_s$ класична рівноважна фотохімія	4. $\tau_0 < \tau_h$; $\tau < \tau_i, \tau_r$ нерівноважні ефекти; нелінійна оптика; інтерференційні явища; 5. $\tau_0 > \tau_h, \tau_r$; $N_f \leq N_s$ – Динамічне підпорогове дефектоутворення, ефект Яна-Теллера, теплові складові лазерного відпалювання та лазерного легування 6. $\tau_0 > \tau_h, \tau_r$; $N_f \gg N_s$ – плавлення, теплове руйнування тощо.	7. Лазерне відпалювання напівпровідників: а) при $\tau_0 < \tau_h$; $\tau > \tau_r, E_g > h\nu > E_a$ – явища 1 та 3; а при $\tau_0 > \tau_h, N_f \gg N_s$ явища 5 та 6; б) $h\nu > E_g, N_f \geq N_s$ явища 5 та 6 8. Лазерне легування та ефекти переключання плівок – суміш явищ 1-6

Тут, згідно з М.М. Боголюбовим, уведені часи, які відповідають різним фізичним явищам і, відповідно, поданням, з допомогою яких їх описують: τ_h – час хаотизації, відповідає локальній релаксації акту збудження (взаємодії); τ_r – динамічний час релаксації системи; τ_i – час опромінення кристала; τ і τ' – час життя збудження в рівноважному та нерівноважному станах, відповідно; τ_0 – час утворення незворотної зміни. Ця класифікація доповнена енергетичними та концентраційними співвідношеннями. Енергетичними характеристиками є: $h\nu$ – енергія кванта падаючого випромінювання; E_g – ширина забороненої зони напівпровідника; E_a – енергія активації відповідного центра збудження; kT –

теплова енергія. Концентраційні характеристики N_f — густина світлового потоку, квант.см⁻²; N_s — густина центрів поглинання (розсіяння) випромінювання.

Часові, енергетичні та концентраційні співвідношення, що наведені в таблиці 1, відповідають тим чи іншим класам фізичних процесів взаємодії оптичного випромінювання з речовиною. В даному випадку ми не прив'язані до того чи іншого математичного формалізму і тому, в залежності від того, які ефекти ми будемо вимірювати, випромінювальної чи безвипромінювальної релаксації, відповідно класичні оптичні (включаючи нелінійнооптичні) чи релаксаційнооптичні, ми й повинні підбирати відповідний метод моделювання.

В якості обґрунтування такого підходу використана узагальнена теорема Сато (узагальнена теорема редукції) [1]. Згідно цієї теореми всяку систему нелінійних інтегро-диференціальних рівнянь можна звести до системи звичайних алгебраїчних рівнянь групи монохромії яких (розв'язки) співпадають. Це було поширено на класифікації.

Такий підхід дозволяє вибирати методи моделювання для опису як незворотних процесів взаємодії оптичного випромінювання з твердими тілами так і процеси випромінювальної релаксації (процеси перевипромінювання та перепоглинання, нелінійно та акустооптичні процеси тощо) [1].

З поняття часової ієрархії фізичних процесів виникла синергетика (теорія самоузгодженої дії), першою найбільш областю застосування якої була фізика лазерів [4]. Саме проблема впорядкування відповідних часів взаємодії та релаксації є основною в релаксаційній оптиці. Безпосередньо синергетичний метод (метод адіабатичного виключення змінних) був використаний при моделюванні ефектів РО за допомогою систем кінетичних рівнянь В. Вольтерри [1].

Однак для більш детального опису процесів РО доцільно використовувати більш повну класифікацію, що наведена в таблиці 1. Зокрема фізико-хімічна модель послідовного каскадного збудження відповідного типу хімічних зв'язків в опромінених матеріалах дозволяє з єдиної точки зору пояснити такі явища сучасної фізики як генерацію випромінювання в напівпровідникових лазерах, механізми руйнування напівпровідникових лазерів, хаотизацію лазерного випромінювання (проблема Хакена), доповнення до критерію утворення дефектів за Зейтцем, фазові та політропні трансформації в лазерноопромінених напівпровідниках (антимонід та арсенід індію, телурид кадмію, селенід кадмію, селенід цинку, сульфід кадмію, кремній, германій, КРТ та т.п.), а також отримання лазерно-індукованих алотропних фаз вуглецю, включаючи переходи алмаз–графіт, графіт–алмаз, графіт–графіт та т.п.

Для задовільного пояснення експериментальних результатів по незворотній взаємодії оптичного випромінювання з антимонідом індію була використана двовимірна решітка сфалериту [1]; а з кремнієм фазова діаграма, згідно якої кремній може мати як мінімум чотири кристалографічні модифікації [1–3]. Такий підхід дозволив з єдиної точки зору пояснити такі явища, як процес лазерної генерації напівпровідникових лазерів, процес зриву цієї ж генерації та процес хаотизації лазерного випромінювання (проблема Хакена).

Слід зазначити, що методами синергетики цю задачу намагався розв’язати Хакен [4] і певні аспекти цих явищ ним були пояснені, однак він не зміг пояснити механізмів цих явищ.

З теоретичної точки зору цей підхід також є суттєвим доповненням до динамічних теорій фазових переходів та перетворень, що супроводжують нелінійно оптичні ефекти [4–7].

Дуже важливим є більш детальне дослідження співвідношення між випромінювальною та безвипромінювальною релаксацією та вплив ефектів перевипромінювання та явищ нелінійної оптики на формування незворотних змін в опромінених матеріалах [1,3]. На відміну від класичної нелінійної оптики нелінійнооптичні ефекти (дроблення кванта опромінення, генерація гармонік, up-коверсія та інші) можуть досліджуватись по їх незворотному «сліді» в середовищі і, таким чином, РО дозволяє поширити область вивчення нелінійнооптичних явищ на область власного поглинання світла.

Проаналізована аналогія мікроскопічного механізму Черенковського випромінювання [1] з поляритонно-плазмонною моделлю лазерного руйнування твердих тіл, та показані певні аналогії цих явищ. Згідно поляритонно-плазмонної моделі Макіних [1,8] для опису цих явищ може бути використана модель нелінійної динаміки Файгенбаума. Сам же процес лазерного руйнування (форма каскаду незворотних змін в об’ємі опромінюваного матеріалу) має кут рівний куту Черенковського опромінення. І, таким чином, можна стверджувати, що мікроскопічний механізм Черенковського випромінювання є «затравочним» процесом для об’ємного лазерного руйнування діелектриків.

Отже, можна зробити висновок, що з методичної точки зору РО можна розглядати як енергетично-концентраційне розширення синергетики на область незворотної взаємодії лазерного випромінювання з твердими тілами. Такий підхід дозволяє, поряд з макроскопічним динамічним описом, пояснити мікроскопічні механізми відповідних явищ, тобто більш повно та адекватно пояснити динаміку цих процесів.

1. Р.Р. Trokhimchuck, *Foundations of Relaxed Optics* (Vezha, Lutsk, 2011), 627 p.
2. П.П. Трохимчук, *Радіаційна фізика твердого тіла* (Вежа, Луцьк, 2007), 394с.
3. Р.Р. Trokhimchuck, *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials* **14**, 363 (2012).
4. Г. Хакен, *Синергетика* (Мир, Москва, 1980), 405 с.
5. Г. Хакен, *Лазерная светлодинамика* (Мир, Москва, 1988), 350 с.
6. Я. Пери́на, *Квантовая статистика линейных и нелинейных оптических явлений* (Мир, Москва, 1987), 368 с.
7. А.В. Андреев, В.И. Емельянов, Ю.А. Ильинский, *Кооперативные явления в оптике* (Наука, Москва, 1988), 287 с.
8. В.С. Макин, Р.С. Макин, А.Я. Воробьев, Ч. Гуо, *Письма в журнал технической физики* **34**, 55 (2008).